

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

А.Л. Толстик

(подпись)

(дата утверждения)

Регистрационный № УД-1200 /уч.

Ядерный топливный цикл и обращение с радиоактивными отходами

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности:**

1-31 05 03

Химия высоких энергий

Минск
2015 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 05 03-2013 и учебного плана № G31-146/уч. от 2013 г для специальности 1-31 05 03 «Химия высоких энергий».

СОСТАВИТЕЛИ:

- 1) Р. Л. Свердлов, старший преподаватель кафедры радиационной химии и химико-фармацевтических технологий Белорусского государственного университета.
- 2) С. Д. Бринкевич, доцент кафедры радиационной химии и химико-фармацевтических технологий Белорусского государственного университета, кандидат химических наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой радиационной химии и химико-фармацевтических технологий
Белорусского государственного университета

протокол № 4 от 09.11.2015;

Учебно-методической комиссией химического факультета Белорусского
государственного университета

протокол № 3 от 10.11.2015.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Дисциплина «Ядерный топливный цикл и обращение с радиоактивными отходами» является дисциплиной по выбору для студентов 3 курса химического факультета, обучающихся по специализации «Химия высоких энергий» в рамках государственной программы подготовки кадров для ядерной энергетики Республики Беларусь на 2008 – 2020 годы.

В дисциплине представлено краткое описание основных технологий современного ядерного топливного цикла: от добычи урановой руды до захоронения радиоактивных отходов. Главное внимание уделено базовым принципам, оборудованию и химико-технологическим процессам, лежащим в основе ядерного топливного цикла.

Целью дисциплины является формирование у студентов представлений о жизненном цикле ядерного топлива, а также процессах хранения, сортировки, перевозки и переработки радиоактивных отходов. **Задача** дисциплины – создать у студентов фундамент знаний в области ядерного топливного цикла и обращения с радиоактивными отходами, который упростит специалистам в будущем самообразование по дисциплине, сократит срок адаптации к условиям работы и будет способствовать успешному выполнению обязанностей на отраслевых предприятиях в рамках выбранной специализации.

В результате изучения дисциплины «Ядерный топливный цикл и обращение с радиоактивными отходами» обучаемый должен **знать**:

- теоретические основы и технологии добычи и обогащения урановой руды,
- методы газодиффузионного и газоцентрифужного разделения изотопов урана, а также альтернативные технологии;
- изотопный состав свежего и облученного ядерного топлива;
- способы сортировки, транспортировки и первичной переработки радиоактивных отходов;
- методы иммобилизации радиоактивных частиц в цементные, стеклянные и битумные матрицы;
- основные требования к геологическим и инженерным барьерам при захоронении радиоактивных отходов.

Обучаемый должен **уметь**:

- применять свои знания для решения исследовательских и прикладных задач в области обращения с радиоактивными отходами;
- предсказывать изменения физико-химических свойств и изотопного состава ядерного топлива в условиях эксплуатации в ядерном реакторе.

Обучаемый должен **владеть:**

- теоретическими знаниями на уровне, позволяющем ему работать с источниками ионизирующего излучения, включая ядерные делящиеся материалы и радиоактивные отходы.
- навыками моделирования комплекса физико-химических свойств и изотопного состава ядерного топлива.
- представлениями о промышленных технологиях переработки радиоактивных отходов.

Дисциплина читается студентам 3 курса очной формы обучения в рамках 6 семестра и рассчитана на 50 часов, из которых 34 часа аудиторной нагрузки: 20 часов – лекции, 10 часов – семинарские занятия, 4 часа – управляемая самостоятельная работа (УСР). Формой аттестации студентов является зачет. Данная дисциплина является теоретической и связана с дисциплиной «Радиационная химия» в рамках указанной специальности.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Ядерный топливный цикл.

Тема 1.1. Вводная лекция по дисциплине.

Атомная энергия и ядерные реакторы. Ядерное топливо. Особенности «сжигания» ядерного топлива. Типы реакторов. Изотопный состав топлива до и после эксплуатации в различных ядерных энергетических установках.

Тема 1.2. Концепции ядерного топливного цикла. Добыча урановой руды и извлечение из нее урана.

Концепции ядерного топливного цикла [Определение. Открытый и замкнутый ядерный топливный цикл. Основные стадии.]. *Уран* [История открытия. Нахождение в природе. Физические и химические свойства.]. Мировые запасы урана. Способы добычи урана. Механическое обогащение урановой руды. *Выщелачивание* [Кислотное. Карбонатное.]. Селективное извлечение урановых соединений из кислотных и карбонатных растворов. Подземное выщелачивание. Тонкая очистка уранового концентрата. Аффинаж.

Тема 1.3. Изотопное обогащение урана.

Изотопное обогащение. Эффективность и энергоемкость обогатительной технологии. Работа разделения. Коэффициент разделения. *Гексафторид урана* [Физико-химические свойства. Конверсия оксидов урана в гексафторид урана.]. *Методы обогащения урана* [Газодиффузионный. Газоцентрифужный. Разделительного сопла. Лазерный. Химический. Электромагнитный. Плазменный.].

Тема 1.4. Фабрикация топлива и изготовление тепловыделяющих сборок.

Виды ядерного топлива. Свойства диоксида урана. Стадии производства таблеток двуоксида урана. Особенности изготовления смешанного оксидного топлива. Свойства металлического урана. Особенности изготовления топлива на основе металлического урана. Изготовление тепловыделяющих элементов. Изготовление тепловыделяющих сборок.

Тема 1.5. Транспортировка и хранение «свежих» и облученных тепловыделяющих сборок. Технологии перегрузки тепловыделяющих сборок.

Топливная перегрузка. Однородная и неоднородная топливная загрузка. *Варианты перегрузки топлива в реактора* [Циклическая перегрузка. Частичная циклическая перегрузка. Рассеянная перегрузка. Перегрузка от периферии к центру. Модифицированная рассеянная перегрузка. Равномерно-частичная перегрузка.]. Технология проведения перегрузок. Требования к транспортировке «свежего» и облученного топлива.

Тема 1.6. Переработка облученного ядерного топлива.

Цели переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ). Мировые мощности по переработке ОЯТ. Требования к качеству переработки ОЯТ. Классификация методов переработки ОЯТ. *Водно-экстракционная технология переработки ОЯТ (PUREX)* [Разборка облученных тепловыделяющих сборок и резка тепловыделяющих элементов. Волоксияция ОЯТ. Растворение твэлов и подготовка раствора к экстракции. Экстракционная переработка.]. SAFAR-технология переработки ОЯТ. DUPIC-технология переработки ОЯТ. Пирохимическая газофторидная технология переработки ОЯТ. Пирометаллургическая технология переработки ОЯТ.

Раздел 2. Обращение с радиоактивными отходами

Тема 2.1. Введение. Классификация радиоактивных отходов.

Цели и принципы обращения с радиоактивными отходами (РАО). Элементы национальной системы обращения с радиоактивными отходами. Классификация РАО. Газообразные, жидкие и твердые РАО. Стадии обращения с РАО. Источники РАО.

Тема 2.2. Сбор, сортировка и переработка радиоактивных отходов. Переработка жидких радиоактивных отходов.

Начальные этапы цикла обращения с РАО [Сбор. Первичная характеристика. Разделение по категориям. Временное хранение]. Выбор технологии переработки РАО. Виды твердых РАО и методы переработки. Виды жидких РАО и методы их переработки. Виды газообразных РАО и методы их переработки. Технология и стадии переработки жидких РАО. Формы нахождения радионуклидов в водных растворах. *Способы очистки и концентрирования жидких РАО* [Фильтрация, сорбция, микрофильтрация, ионный обмен, обратный осмос, электродиализ, коагуляция, ультрафильтрация, выпаривание, термическая обработка].

Тема 2.3. Переработка твердых и газообразных радиоактивных отходов. Иммобилизация РАО.

Источники твердых РАО. *Способы обработки твердых РАО* [Компактирование. Фрагментация. Термическое воздействие: сжигание, плавление, термическая декомпозиция, окисление.]. Источники газообразных РАО. Системы вентиляции и газоочистки. Иммобилизация РАО. Цементирование. Битумирование. Иммобилизация РАО в полимеры. Остекловывание РАО. Обращение с отработавшими закрытыми радиоактивными источниками.

Тема 2.4. Хранение и захоронение радиоактивных материалов. Дезактивация.

Временное хранение отходов. Принципы радиологической защиты (ALARA).

Требования к упаковкам отходов, критерии приемлемости (WAC). Требования к временным хранилищам отходов. Этапы временного хранения отходов. Типы хранилищ. Захоронение отходов. *Типы захоронений* [Глубоководное. Геологическое. Приповерхностное. В глубинных отложениях морского дна. Под морским дном.]. Классификация отходов для захоронения. Этапы реализации захоронения.

Определение дезактивации. Объекты дезактивации. Коэффициент дезактивации. Классификация загрязнений. Методы дезактивации. Химическая дезактивация. Дезактивирующие покрытия. Механические методы дезактивации. *Альтернативные методы дезактивации* [Электрополировка. Ультразвуковая чистка. Плавление.].

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов		Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Семинарские занятия		
1	2	3	4	5	6
	Ядерный топливный цикл и обращение с радиоактивными отходами	20	10	4	-
Раздел 1. Ядерный топливный цикл.		12	6	2	-
Тема 1.1.	Вводная лекция по дисциплине.	2	-	-	-
Тема 1.2.	Концепции ядерного топливного цикла. Добыча урановой руды и извлечение из нее урана.	2	2	-	опрос
Тема 1.3.	Изотопное обогащение урана.	2	-	-	-
Тема 1.4.	Фабрикация топлива и изготовление тепловыделяющих сборок.	2	2	-	опрос
Тема 1.5.	Транспортировка и хранение «свежих» и облученных тепловыделяющих сборок. Технологии перегрузки тепловыделяющих сборок.	2	-	-	-
Тема 1.6.	Переработка облученного ядерного топлива.	2	2	-	опрос
1.7.	УСР1. Ядерный топливный цикл.	-	-	2	коллоквиум
Раздел 2. Обращение с радиоактивными отходами.		8	4	2	-
Тема 2.1.	Введение. Классификация радиоактивных отходов.	2	-	-	-
Тема 2.2.	Сбор, сортировка и переработка радиоактивных отходов. Переработка жидких радиоактивных отходов.	2	2	-	опрос
Тема 2.3.	Переработка твердых и газообразных радиоактивных отходов. Имобилизация РАО.	2	-	-	-
Тема 2.4.	Хранение и захоронение радиоактивных материалов. Дезактивация.	2	2	-	опрос
2.5.	УСР2. Обращение с радиоактивными отходами.	-	-	2	коллоквиум, зачет

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ЗАДАНИЙ УСР

УСР 1. Ядерный топливный цикл (вопросы к коллоквиуму)

1. Дайте определение понятию «ядерный топливный цикл» (ЯТЦ)? Перечислите основные стадии ЯТЦ? Открытый и замкнутый ЯТЦ?
2. Уран. Краткая история открытия? Содержание урана в земной коре и морской воде? Классификация урановых руд по содержанию в них урана? Рентабельность добычи урана? Перечислите страны входящие в тройки лидеров по запасам и производству урана?
3. Классификация способов добычи урана, в чем их отличие? Последовательность действий при извлечении урана из рудной массы? Методы механического обогащения урановой руды?
4. Выщелачивание урановых соединений из руды? Кислотное и карбонатное выщелачивание? Способы селективного извлечения соединений урана из кислотных или карбонатных растворов?
5. Подземное выщелачивание? Добыча урана из морской воды? Аффинаж уранового концентрата?
6. Технологии изотопного обогащения урана? Эффективность и энергоемкость обогатительных технологий? Сравните эффективность (по коэффициенту разделения) и энергоемкость существующих технологий изотопного обогащения?
7. Баланс массы урана и изотопа урана-235 при изотопном обогащении? Коэффициент: расхода природного урана на единицу продукта; образования отвалов на единицу продукта; деления потока природного урана? Относительная концентрация урана-235 в бинарной смеси: перед обогащением, на выходе продукта; на выходе отвалов? Коэффициенты: разделения по обогащенной фракции, разделения по обедненной фракции, обогащения, обеднения, полного обогащения?
8. В какой форме уран используется для обогащения? Достоинства и недостатки гексафторида урана? Конверсия оксидов урана в гексафторид урана?
9. Обогащение урана методом газовой диффузии?
10. Обогащение урана в газовых центрифугах?
11. Лазерные методы обогащения урана?
12. Виды ядерного топлива? Свойства диоксида урана? Стадии производства топливных таблеток диоксида урана?
13. Изготовление топлива на основе металлического урана? Стадии изготовления тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок?

14. Топливные перегрузки? Цели перегрузки? Однородная и неоднородная топливная загрузка? Варианты перегрузки топлива в реакторах?

15. Технология проведения перегрузок? Временное хранение облученных тепловыделяющих сборок? Транспортировка облученного топлива, транспортные контейнеры?

16. Переработка облученного ядерного топлива (ОЯТ): цели, причины, требования? Классификация методов переработки ОЯТ?

17. Водно-экстракционная технологии переработки ОЯТ (технология PUREX)?

18. Экстракционная переработка ОЯТ? Особенности переработки ОЯТ быстрых реакторов?

УСР 2. Обращение с радиоактивными отходами (вопросы к коллоквиуму).

1. Определение радиоактивных отходов (РАО)? Виды РАО? Цели обращения с РАО? Стадии обращения с радиоактивными отходами?

2. Источники радиоактивных отходов (РАО)? Классификация РАО?

3. Начальные этапы цикла обращения с РАО? Требования к упаковкам для хранения РАО? Временное хранилище РАО?

4. Факторы, обуславливающие выбор технологии обращения с радиоактивными отходами (РАО)? Методы переработки РАО?

5. Технология переработки жидких радиоактивных отходов (ЖРО)? Способы очистки и концентрирования ЖРО?

6. Способы очистки и концентрирования жидких радиоактивных отходов (ЖРО)? Стадии работ по очистке ЖРО?

7. Источники твердых радиоактивных отходов (РАО)? Цели обработки твердых радиоактивных отходов (ТРО)? Способы обработки ТРО?

8. Источники газообразных радиоактивных отходов (ГРО)? Задачи системы вентиляции и газоочистки? Организация вентиляционной системы?

9. Организация вентиляционной системы при обращении с газообразными радиоактивными отходами (ГРО)? Приточная и вытяжная вентиляция?

10. Термические технологии обработки радиоактивных отходов (РАО)? Сжигание, термохимическая обработка, плавление?

11. Иммобилизация РАО? Цементирование, битумирование, включение РАО в полимерную матрицу?

12. Остекловывание радиоактивных отходов (РАО)? Схема технологии остекловывания жидких радиоактивных отходов (ЖРО)?

13. Обращение с отработавшими закрытыми радиоактивными источниками?

14. Наиболее распространенные закрытые радионуклидные источники? Группы радионуклидных источников (зарегистрированные, незарегистрированные, дефектные)? Варианты обращения с отработавшими радионуклидными источниками?

15. Временное хранение радиоактивных отходов (РАО)? Принципы радиологической защиты?

16. Требования к упаковкам и хранилищам радиоактивных отходов? Основные этапы хранения отходов?

17. Хранилища отходов, их типы? Перемещение упаковок в хранилище, загрузка и регистрация упаковок?

18. Захоронение отходов (цели, типы, требования, этапы)?

19. Дезактивация (объекты, классификация загрязнений по механизму их взаимодействия с поверхностью вещества)?

20. Методы дезактивации?

ПЛАН СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ

Раздел 1. Ядерный топливный цикл.

Тема 1.1. Типы реакторов. Изотопный состав топлива до и после эксплуатации в различных ядерных энергетических установках (РБМК, ВВЭР, БН, CANDU, исследовательские реакторы). Добыча и переработка урановых руд.

Тема 1.2. Методы обогащения урана. Свойства и технологии производства топлива для ядерных энергетических установок.

Тема 1.3. Транспортировка свежих и облученных сборок. Технологии переработки облученного ядерного топлива: PUREX, SAFAR, пирохимические и пирометаллургические методы, DUPIC.

Раздел 2. Обращение с радиоактивными отходами.

Тема 2.1. Методы переработки жидких радиоактивных отходов. Обеспечение нераспространения делящихся материалов.

Тема 2.2. Иммобилизация и захоронение радиоактивных отходов.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Андриюшин, И.А. Юдин, Ю.А. Обзор проблем обращения с радиоактивными отходами. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010 г. – 119 с.
2. Апсэ, В.А., Шмелев, А.Н. Ядерные технологии: учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. – 128 с.
3. Давиденко, Н.Н., Куценко, К.В., Тихомиров, Г.В., Лаврухин, А.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами в атомной энергетике: учебное пособие – М.: МИФИ, 2007. – 136 с.
4. Громов, Б.В., Савельева, В.И., Шевченко, В.Б. Химическая технология облученного ядерного топлива: учебник для вузов М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.
5. Камнев, Е.Н., Морозов, В.Н., Шищиц, И.Ю. Выбор площадок для захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях. – М.: Горная книга, 2011. – 207 с.
6. Лебедев, В.М. Ядерный топливный цикл: Технологии, безопасность, экономика. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 316 с.
7. Миронов, В.П. Обращение с радиоактивными отходами: учебно-методическое пособие / В.П. Миронов, В.В. Журавков. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова. 2009. – 172 с.
8. Никифоров, А.С., Куличенко, В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. – М.: Энергоиздат, 1985. – 184 с.
9. Скачек, М.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.
10. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность / Афров А.М., Андрущенко С.А., Украинцев В.Ф., Васильев Б.Ю., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Кокосфдзе Э.Л., Иванов Е.А. – М.: Университетская книга, Лагос, 2006. – 488с.
11. Обогащение урана / Под ред. С. Виллани; пер с англ. под ред. И.К. Кикоина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
12. Ядерная энергетика. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами (обзор по материалам зарубежной и отечественной печати) / под ред. И. М. Неклюдова. – Киев: Наукова думка, 2006. – 253 с.

Дополнительная литература

1. Бойко, В.И., Демянюк, Д.Г., Кошелев, Ф.П., Мещеряков, В.Н., Шаманин, И.В., Шидловский, В.В. Перспективные ядерные топливные циклы и реакторы нового поколения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 490 с.

2. Жерин, И.И., Амелина, Г.Н. Химия тория, урана, плутония: учебное пособие – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – 147с.
3. Машиностроение ядерной техники. В 2-х кн. Кн. 1. / Под общ. ред. Е.О. Адамова. – М: Машиностроение, 2005. – 960 с.
4. Машиностроение ядерной техники. В 2-х кн. Кн. 2. / Под общ. ред. Е.О. Адамова. – М: Машиностроение, 2005. – 944 с.
5. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами // Серия учебных курсов МАГАТЭ. – Вена, МАГАТЭ, 2005.

ПРОТОКОЛ
СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО ПО ИЗУЧАЕМОЙ
ДИСЦИПЛИНЕ С ДРУГИМИ ДИСЦИПЛИНАМИ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола) ¹
Радиационная химия	Радиационной химии и химико-фармацевтических технологий	Предложений нет	Принять программу без изменений. 09.11. 2015г №4

¹ При наличии предложений об изменениях в содержании учебной программы УВО.

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО

на ____/____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание
-	-	-

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
радиационной химии и химико-фармацевтических технологий (протокол №
____ от _____ 201_ г.)
(название кафедры)

Заведующий кафедрой

(ученая степень, ученое звание) (подпись) (И.О.Фамилия)

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета

(ученая степень, ученое звание) (подпись) (И.О.Фамилия)